

学校编码: 10384

分类号\_\_密级\_\_

学号: 25320111151725

UDC\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

一种用于土—结构相互作用体系非线性地震动力响  
应分析的基于数值解与解析解耦合的新方法

A novel method coupling numerical and analytical methods  
for seismic dynamic response analysis of soil-structure  
interaction systems

傅敏红

指导教师姓名: 古 泉 副教授

专 业 名 称: 岩 土 工 程

论文提交日期: 2014 年 4 月

论文答辩时间: 2014 年 5 月

学位授予时间: 2014 年 6 月

2014 年 5 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用说明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（      ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于      年      月      日解密，解密后适用上述授权。

（   √  ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年      月      日

## 摘 要

本文提出了一种新的数值解与解析解耦合的理论和计算方法,研究土-结构相互作用(SSI)体系的地震动力响应。在 SSI 分析方法中,传统的基于频域内的解析方法只适用于简单的线弹性结构、刚性基础和等效线弹性的半无限大地基组成的体系中,具有较大的局限性。而基于非线性有限元的数值法,能较好的处理实际问题中的复杂结构,考虑地震中土和结构的非线性行为、土-结构之间的接触面以及土的边界等问题,但该方法计算量大。因此在子结构法的基础上,本文提出了一种新型的数值解与解析解耦合方法。这种方法用有限元程序 OpenSees 模拟复杂结构的非线性行为,用等效线弹性频域内的解析解模拟地基土的行为,使用时域离散递归方法(recursive filter)将频域内的解析解转化到时域内,再通过整个体系中不同子结构边界上力和位移的协调来求解。解析解用 C++ 程序编制,二者之间的耦合和实时数据交流通过基于 CS 方法的集成方法来实现。

为验证此耦合算法的效率、精度和工程实用性,本文首先以一个单自由度体系为例,详细介绍了 SSI 分析的基本步骤及关键点,并分析得到位移频域响应函数(displacement frequency response functions)。通过与频域内解析解的频域响应函数对比,分析和量化了此方法的误差,讨论了时间步长、阻尼等对误差的影响。分析研究了当结构进入非线性和非线性程度逐渐增加时的系统响应变化、频域响应函数变化。其次,将此 SSI 耦合算法应用于一个简单的两层多自由度框架模型中,再次通过对比解析解和耦合算法得到的频域响应函数来验证此方法的精度、稳定性和实用性,并分析和量化其误差。对结构进行非线性分析,考虑不同时间步长和阻尼对地震反应的影响,讨论了非线性结构是否考虑柔性地基的动力响应。最后,本文以一个实际工程,美国加州理工大学 Millikan 图书馆为例,基于此耦合 SSI 方法研究其在地震作用下的非线性动力问题,对比在考虑和不考虑 SSI 体系情况下结构动力响应的区别。本文所提的耦合 SSI 计算方法和部分研究成果为工程设计人员提供参考。

**关键词:** 土-结构相互作用; 子结构法; CS 方法; 数值解与解析解耦合方法; OpenSees; 非线性地震动力响应分析

## Abstract

A novel coupling method for performing nonlinear seismic analysis of soil-structure interaction (SSI) systems is presented, combining analytical and numerical methods. The closed form analytic solutions in frequency domain for SSI problems has limitations that it can be applicable to only simple linear elastic structure, rigid foundation and semi-infinite linear elastic soils. On the other hand, nonlinear finite element method is able to simulate the nonlinear seismic response of SSI systems, dealing well with nonlinear SSI. However it is time consuming, and need to treat the special boundary of soil domain. In this context, the thesis presents a new coupling method for nonlinear seismic analysis of SSI problems. This method is based on substructure method, in which the structure is modeled and analyzed by nonlinear FEM, and the soil by a time domain solution transformed from frequency domain closed form solution using a discrete time domain recursive filter. The boundary conditions of force and displacement between soil and structure are satisfied by using Newton's method. The nonlinear structural behavior is modeled by a FEM software, OpenSees, and closed form analytical solutions is implemented in C++ programming. The coupling between this two substructures are based on a real-time data communication technique, the CS integration technique.

Several examples are studied in order to verify the coupling methods in sense of efficiency, precision and practicability. First of all, a single degree of freedom (SDOF) structure and soil system is taken as an example. The basic steps and key points of SSI analysis are presented in detail. The displacement frequency response function obtained by coupling method is computed with the corresponding analytical solution in frequency domain. The numerical error is calculated and the possible source is analyzed. The effect of time step size and damping on the precision of the coupling method is discussed. The change of the structural responses and displacement frequency responses with increasing nonlinearity of the SSI system is studied. Secondly, the coupling method is applied to a simple MDOF structure and soil system

to verify its precision, stability and applicability to MDOF structure – soil systems. The analytical frequency response function of the SSI system is derived, which is then used to verify the corresponding function obtained by the coupling method. For responses of SSI system with nonlinear MDOF structure, the effect of time step size, damping, and earthquake intensity are studied. The difference of the nonlinear structural responses with SSI v.s. without SSI is studied. Finally, the coupling method is used for seismic analysis of a real SSI system, the Millikan library in university of California institute of technology. The nonlinear seismic responses are studied. The differences are studied between conditions of considering SSI v.s. not considering SSI effects. This paper proposed a practical method for nonlinear seismic analysis of SSI systems, and part of the research results provides valuable insight for engineering practice.

**Key words:** Soil-Structure Interaction; Substructure method; CS method; Coupling of numerical and analytical method; OpenSees; Nonlinear earthquake dynamic response analysis

目 录	
摘 要 .....	i
Abstract .....	ii
第一章 绪 论 .....	1
1.1 土—结构相互作用的基本概念 .....	1
1.2 论文的选题背景 .....	2
1.3 解析法和数值法的研究现状 .....	4
1.4 本文的研究目的和主要内容 .....	8
1.4.1 本文研究目的 .....	8
1.4.2 本文主要研究内容 .....	9
第二章 土—结构相互作用的分析理论 .....	11
2.1 引言 .....	11
2.2 土—结构相互作用的理论分析方法 .....	11
2.2.1 集中参数法 .....	11
2.2.2 整体分析法 .....	12
2.2.3 子结构法 .....	12
2.3 土—结构相互作用的有限元数值分析方法 .....	19
2.3.1 OpenSees 程序的介绍 .....	19
2.3.2 结构动力平衡方程的建立及阻尼的确定 .....	20
2.4 影响结构动力反应的因素分析 .....	23
2.4.1 地震动幅值 .....	23
2.4.2 地震动持续时间 .....	23
2.4.3 地震动频谱特性 .....	24
2.4.4 地震波的选取与输入 .....	24
2.5 小结 .....	25
第三章 数值解与解析解耦合的分析方法 .....	26

3.1	引言	26
3.2	SSI 体系在频域内的解析解	26
3.2.1	线性假设	26
3.2.2	解析解的推导	27
3.2.3	SDOF 结构体系在频域内的动力响应	29
3.3	SSI 体系中数值解与解析解的耦合方法	33
3.3.1	频域内的解析解转换到时域内	33
3.3.2	耦合方法的基本原理	37
3.3.3	基于 OpenSees 的 CS 方法	41
3.4	基于时域离散递归方法拟合的频率相关柔度函数	45
3.5	小结	48
第四章	由 SDOF 结构组成的 SSI 体系地震动力响应分析	49
4.1	引言	49
4.2	基于 OpenSees 的分析模型	49
4.2.1	材料的本构模型	49
4.2.2	单元模型	51
4.3	土-结构相互作用分析模型及其参数确定	51
4.3.1	土-结构相互作用分析模型	51
4.3.2	地基土参数的确定	52
4.3.3	上部结构参数的确定	52
4.4	SDOF 结构组成 SSI 体系的线弹性动力响应	52
4.4.1	正弦波振下 SSI 体系的线弹性动力响应	53
4.4.2	计算结果及分析	54
4.5	SDOF 结构组成 SSI 体系的非线性动力响应	60
4.5.1	不同强度地震下位移频率响应曲线	60
4.5.2	计算结果及分析	60
4.6	考虑与不考虑土-结构相互作用的动力时程分析	64
4.6.1	地震波的输入	64
4.6.2	时程分析结果对比	65



4.7 小结.....	69
<b>第五章 由 MDOF 结构组成的 SSI 体系地震动力响应分析.....</b>	<b>70</b>
5.1 引言.....	70
5.2 MDOF 结构组成 SSI 体系的动力反应分析.....	70
5.2.1 两层框架模型.....	70
5.2.2 运动平衡方程及解.....	70
5.3 MDOF 结构组成的 SSI 体系地震反应分析.....	82
5.3.1 两层框架的线弹性地震响应.....	82
5.3.2 两层框架的非线性地震响应.....	85
5.4 数值算例.....	92
5.4.1 Millikan 图书馆大楼 .....	92
5.4.2 自振周期与阻尼比 .....	93
5.4.3 Millikan 图书馆的非线性地震反应 .....	94
5.5 小结.....	97
<b>第六章 结论与展望 .....</b>	<b>99</b>
6.1 结论.....	99
6.2 展望.....	100
<b>参考文献.....</b>	<b>102</b>
<b>致 谢 .....</b>	<b>108</b>
<b>作者攻读硕士学位期间发表的论文 .....</b>	<b>109</b>

<b>Abstract in Chinese</b> .....	i
<b>Abstract in English</b> .....	ii
<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	1
<b>1.1 The concept of Soil-Structure Interaction</b> .....	1
<b>1.2 Motivation</b> .....	2
<b>1.3 Overview of analytical and numerical methods</b> .....	4
<b>1.4 Objective and Scope</b> .....	8
1.4.1 Objective.....	8
1.4.2 Scope.....	9
<b>Chapter 2 Soil-Structure Interaction Theory</b> .....	11
<b>2.1 Introduction</b> .....	11
<b>2.2 Analysis of Soil-Structure Interaction method</b> .....	11
2.2.1 Lumped parameter method.....	11
2.2.2 The overall method.....	12
2.2.3 Substructure method.....	12
<b>2.3 Soil-Structure Interaction numerical method</b> .....	19
2.3.1 OpenSees procedure introduction.....	19
2.3.2 Balance equation of structure and damping calculation.....	20
<b>2.4 Affect factors of structure dynamic response analysis</b> .....	23
2.4.1 Seismic oscillation amplitude.....	23
2.4.2 Seismic oscillation duration time.....	23
2.4.3 Seismic oscillation spectral characteristic.....	24
2.4.4 Seismic wave selection and input.....	24
<b>2.5 Concluding Remarks</b> .....	25
<b>Chapter 3 Coupling of Numerical and Analytical methods</b> .....	26

<b>3.1 Introduction .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2 Analytical solution of SSI system in frequency domain.....</b>	<b>26</b>
3.2.1 Linear hypothesis .....	26
3.2.2 Derivation of the analytical solution .....	27
3.2.3 The dynamic response of SDOF system in frequency .....	29
<b>3.3 Coupling methods of numerical and analytical for SSI system.....</b>	<b>33</b>
3.3.1 The solution in frequency convert to time domain .....	33
3.3.2 Coupling methods basic theory.....	37
3.3.3 CS method based on OpenSees.....	41
<b>3.4 The discrete time domain recursive method fitting frequency related compliance function.....</b>	<b>45</b>
<b>3.5 Concluding Remarks .....</b>	<b>48</b>
<b>Chapter 4 Composed SDOF of SSI system for seismic response analysis .....</b>	<b>49</b>
<b>4.1 Introduction .....</b>	<b>49</b>
<b>4.2 Analytic model based on OpenSees.....</b>	<b>49</b>
4.2.1 Material constitutive model .....	49
4.2.2 Element model .....	51
<b>4.3 Analytic model of SSI system and parameter determination.....</b>	<b>51</b>
4.3.1 Analytic model of SSI system.....	51
4.3.2 Soil parameters determination .....	52
4.3.3 Superstructure parameters determination .....	52
<b>4.4 Composed SDOF of SSI system for linear elastic dynamic response ..</b>	<b>52</b>
4.4.1 Sinusoidal vibration of SSI system for linear elastic dynamic response.....	53
4.4.2 Results and Analysis.....	54
<b>4.5 Composed SDOF of SSI system for nonlinear dynamic response .....</b>	<b>60</b>
4.5.1 Different intensity earthquake for the displacement of the frequency response curve .....	60

4.5.2 Results and Analysis.....	60
<b>4.6 Consider and not consider SSI system for dynamic and time-historical analysis .....</b>	<b>64</b>
4.6.1 Input seismic wave .....	64
4.6.2 Results of time history analysis comparison .....	65
<b>4.7 Concluding Remarks .....</b>	<b>69</b>
<b>Chapter 5 Composed MDOF of SSI system for seismic response analysis .....</b>	<b>70</b>
5.1 Introduction .....	70
5.2 Composed MDOF of SSI system for dynamic response analysis .....	70
5.2.1 Two storey frame structure model.....	70
5.2.2 Balance equation .....	70
5.3 Composed MDOF of SSI system for seismic response analysis.....	82
5.3.1 Two storey frame structure for linear elastic seismic response .....	82
5.3.2 Two storey frame structure for nonlinear seismic response .....	85
5.4 Numerical Example.....	92
5.4.1 Millikan library .....	92
5.4.2 Natural vibration period and damping ratio.....	93
5.4.3 Millikan library for nonlinear seismic response .....	94
5.5 Concluding Remarks .....	97
<b>Chapter 6 Conclusion and Prospect .....</b>	<b>99</b>
6.1 Summary .....	99
6.2 Future Research .....	100
<b>Reference.....</b>	<b>102</b>
<b>Acknowledgments.....</b>	<b>108</b>
<b>List of Publications.....</b>	<b>109</b>

## 第一章 绪 论

### 1.1 土—结构相互作用的基本概念

土—结构相互作用是地震、台风、爆炸等过程中一个普遍存在的现象。比如，在地震作用下，地震波从震源出发通过土的传播，传输到上部结构物体上使其振动，同时结构物反作用于地基上，导致基础相对于土产生额外的平移和转动，进而影响结构体系的动力响应。这种作用力和反作用力的存在，使得地基和上部结构之间存在力、变形等方面互相影响和相互制约的现象，称为土—结构相互作用（Soil-Structure Interaction，缩写为 SSI）<sup>[1,2]</sup>。

从力学分析角度看，土—结构相互作用是由两个方面组成，静力相互作用和动力相互作用。静力相互作用是通过上部结构的自重荷载等作用对基础产生的摩擦力或者其他形式的力；而动力相互作用是土—结构相互作用体系在风、地震和爆炸等荷载作用下，研究整个体系中随时间变化的位移、速度和加速度等动力响应问题<sup>[3]</sup>。从土—结构的动力相互作用类型来分析分析，可分为自由场反应分析、惯性相互作用分析和运动相互作用分析。自由场反应分析是指通过基岩输入确定自由场地面运动的过程，由于基岩上的土层对地震波有放大和滤波效应，在那种未建建筑物或者未经开挖的场地输入一地震波时，自由场表面的运动与基岩输入的地震波幅值和频率有关，通过这种与地震波相关的运动来确定自由场的运动。惯性相互作用分析主要研究在土—结构动力系统中，上部结构振动惯性力对基础产生剪力和弯矩，而导致结构与基础之间的相对位移以及基础的平动和转动，从而构成了在惯性荷载作用下该动力系统的惯性相互作用。外部荷载、基础与周边土体刚度差异、入射波瞬时作用于基础，以及场地的地震动都将导致上部结构、基础及土体之间的相互作用，这种相互作用称为运动相互作用<sup>[4]</sup>。

虽然土—结构相互作用是一个普遍存在的现象，但在计算时为了分析简单，在结构分析中往往并不考虑土—结构相互作用，而是假定地基土体是不变形的刚体。但是在复杂的重大基础工程中，往往需要考虑土—结构相互作用的影响。所以，有必要研究一些实用的土—结构相互作用分析计算方法，并探究其相互作用对结构安全性和性能的影响。

土-结构相互作用研究的主要任务是建立 SSI 体系的力学模型、分析力学机理、研究理论方法、耦合效应和地震特性等方面,力求解决多种介质的动力耦合问题。为岩土工程、结构工程、地震工程等诸多领域的动力分析和工程设计提供理论基础和分析方法。随着建筑工程的安全性要求不断提高以及抗震和防灾减灾工程的迫切需要,土-结构相互作用逐渐得到广泛的关注。发展有效、实用的土-结构相互作用分析方法,在理论和实践上进一步研究是十分必要和重要的。

## 1.2 论文的选题背景

我国地处环欧亚地震带和太平洋地震带之间,是大陆区域地震带中最活跃的国家之一,地震区域广阔、分散,地震频发、强烈。从 2008 年 5 月 12 日汶川等发生的地震来看,在地震较活跃的地区,地震产生的作用比其他荷载组合产生的作用造成更大的破坏,使地震成为影响控制设计的主要因素<sup>[5,6]</sup>。为了保障人民生命财产安全和减轻地震灾害,对已建建筑进行抗震安全评估和合理的抗震设防已成为结构工程的重要工作。

地震是一种突发式的自然灾害,历次地震的惨痛教训及结构在地震当中所遭受的破坏,说明强地震在短时间内就可能造成严重破坏。下面就地震造成的破坏情况举例,如图 1.1 中 (a) 是在 2008 年汶川 8.0 级地震中,房屋受到来自不同方向的力导致承重改变、受力不均匀,引起房屋倒塌;(b) 是 1976 年唐山发生的 7.8 级地震,由于建筑物重量或刚度极不对称引起房屋扭转破坏;(c) 为青海玉树 7.1 级地震动荷载下引起道路裂缝;(d) 为汶川地震时,由于地震使桥梁产生水平和竖向振动,造成桥梁构件的损坏和破坏,甚至倒塌。

在地震震害的调查中发现,结构的破坏与结构的刚度、自振特性和土层的性质、深度有关。如 1957 年的墨西哥地震中,距震中 220 公里的墨西哥城,一座 44 层建在较硬地基土上的建筑物安然无恙,而在 1985 年墨西哥的 8.1 级地震中,这座 44 层建筑依然完好无损。这说明土的软硬程度对结构动力相互作用有一定的影响作用。又比如在 1975 年,距震中约 110 公里,发生在我国海城的地震,一些高度在 10 米以内的小建筑和一些刚度较大、内部隔墙较多的建筑物,基本上无损害;而许多高大建筑物以及建在一些比较空旷、刚度较小的建筑物,受到了不同程度的破坏<sup>[7]</sup>。此外,关于桥梁破坏方面,唐山地震时,和滦县的芦台桥、

滦河大桥、胜利桥等均由于桥台或桥墩滑移造成桥梁的破坏。这些震害调查显示，地震带来的破坏程度有大有小。考虑地震引起结构的破坏，将土—结构作为一个体系进行抗震研究是十分有必要的。



(a) 地震引起房屋倒塌 (汶川, 2008)



(b) 地震引起房屋扭转破坏(唐山, 1976)



(c) 地震引起道路裂缝(青海, 2010)



(d) 地震引起桥梁破坏(汶川, 2008)

图 1.1 地震引起的地震灾害

对于土-结构相互作用的研究方法,传统的解析方法是假定土体和结构均为线弹性或等效线性,从而求解土-结构相互作用体系的线弹性地震响应。而对于非线性问题,考虑到体系进入非线性状态后,其自振特性与加载、卸载状态有关,这种假定的线性或等效线性原理的分析方法,严格上解频域内的地震响应问题不再适用,具有一定的局限性<sup>[8]</sup>。而基于非线性有限元的分析方法可以很好地解决这个问题,但也有一定局限性,主要是计算时间过多,无穷远域的截断边界,以及地震波输入方法等问题。常用的人工边界法和数值计算方法,基本上也还是建立在线性或等效线性假设的基础之上。因此基于非线性有限元的 SSI 分析方法具有可改进空间。

除此之外,在地震等动力荷载作用下,结构的动力响应是由激励荷载、地基和上部结构三者的特性共同决定。其中处理基础与结构之间的界面问题一直是研究的难点,土体和结构是两种属性不同的材料,两者之间的接触、脱离等非线性问题,是模拟真实的 SSI 体系非线性动力响应的难点之一,值得进行深入研究。

而考虑不同工程场地的地震动输入,其地震动幅值、地震持续时间和频谱对土-结构相互作用体系存在影响,对同一建筑结构进行动力响应分析时,采用不同的地震波,即使记录的加速度最大值相同,得出的动力反应也可能完全不同,同时不同类型的场地对地震波也存在较大影响。因此,如何合理的选取地震波也是一个关键性问题。

综上所述,SSI 体系分析方法的研究非常重要,也是极具挑战性的。本论文着眼于 SSI 数值分析方法研究,力图寻找一种高效、实用的新方法,对土-结构相互作用问题进行分析,并得到一些有意义的结论,以期获得一些方法上的进展和突破。

### 1.3 解析法和数值法的研究现状

20 世纪初期,研究者们已经考虑到地基和上部结构是一个相互耦合的复杂体系,在对土-结构相互作用进行动力分析时,提出了各种符合实际的理论方法。对于土-结构相互作用耦合问题理论方法的研究,可以追溯到 1904 年 Lamb<sup>[9]</sup>对弹性地基振动问题的分析,随后,在 Lamb 解的基础上,Reissner 研究了弹性半无限空间刚性圆形基础在竖向荷载下的振动问题,为土和结构动力相互作用问



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库